ガス絶縁変圧器への高耐熱・低誘電率絶縁材料の適用

正員 村松 浩史 (東芝) 正員 合田 剛 (東芝)
 正員 池田 正巳 (九州工業大学) 正員 平井 匡平 (東芝)
 正員 石岡 康昭 (東芝) 正員 戸田 克敏 (東芝)

Study on Application of thermally upgraded and low permittivity dielectrics to Gas Insulated Transformer

Koji Muramatsu, Member (Toshiba Corporation) Takeshi Goda, Member (Toshiba Corporation)
 Masami Ikeda, Member (Kyusyu Institute of Technology) Kyohei Hirai, Member (Toshiba Corporation)
 Yasuaki Ishioka, Member (Toshiba Corporation) Katsutoshi Toda, Member (Toshiba Corporation)

Gas insulated transformers have been applied to the substations widely from the view points of the fire prevention and the land shortage. The cellulose fiber pressboards that have been used in the oil immersed transformer for the long term are also adopted as a main insulated material for lower voltage and smaller capacity gas insulated transformers so far. However, thermally upgraded and low permittivity dielectrics are desired to realize higher voltage, large capacity gas insulated transformer. Then authors focus on new synthetic fiber pressboard that made of mixture of polyethylene terephthalate (abbr. PET) and polyamid fibers. But there is no report investigated about the characteristics of the new synthetic fiber pressboard in the application to gas insulated transformers. In this paper, the authors report the investigated results of this material about mechanical, physical, dielectric characteristics of this material from the comparison with these characteristics of the conventional cellulose fiber pressboard. It is described that the application of this new synthetic fiber pressboard to world highest voltage and largest capacity gas insulated transformer.

キーワード：ガス絶縁変圧器、SF₆ガス、高耐熱絶縁材料、低誘電率材料

1. はじめに

近年、大都市での電力需要の増加により、都市部の地下に変電所が設置されるようになってきている。それに伴い防災性能あるいは保守点検の簡素化などが要求され、不燃性、防爆性を特徴とするコンパクト化されたガス絶縁変圧器あるいはガス絶縁リアクトルなどのニーズは高い⁽¹⁾⁽²⁾。ガス絶縁変圧器では、主たる絶縁材料としては、従来から油入り変圧器に実績のあるA種（最高使用温度105℃）のセルロース製のプレスボードが使用されてきている。しかし、ガス絶縁変圧器についてもさらなる大容量化、コンパクト化が望まれるようになり、これらを実現するためには耐熱性が高く、絶縁面でも優れた低誘電率材料の適用が必要となってきた。低誘電率材料を油入変圧器に適用した研究としては鎌田氏らの研究⁽⁴⁾があるが、ガス絶縁変圧器への新材料適用に焦点を当てた研究報告は筆者らが知る限りなく、材料特性を十分に研究する必要がある。筆者らはガス絶縁変圧器への適用で有望な新材料としてPET（Polyethylene Terephthalate）と芳香族ポリアミド（Polyamide）の繊維を混抄した新しい合成繊維セルロースプレスボードに着目した。

本論文では、ガス絶縁変圧器の使用環境での合成繊維セルロースプレスボードの機械的特性、物理的特性、誘電絶縁特性について調査し、従来より油入り変圧器で使用されているセルロースプレスボードの同特性値と比較した。さらに、SF₆ガス中における耐熱性についても調査し、耐熱クラス評価をするとともに、寿命の評価に有用な知見を得たので報告する。

本文ではセルロースプレスボードをセルロースボード、合成繊維プレスボードを合成繊維ボードと短縮して呼ぶことにする。

2. 合成繊維ボード

合成繊維ボードは、PET繊維80%と芳香族ポリアミドバルブ20%の原料から構成されており、抄紙後加圧圧縮により所定の厚さに製造される。

表1に合成繊維ボードとセルロースボードの密度を示す。ほぼ同等の密度になっている。

表1 密度
Table1. Density
密度 (g/cm³)

合成繊維ボード	1.07
セルロースボード	1.15

3. 合成繊維ボードの特性評価

合成繊維ボードをガス絶縁変圧器に適用する場合、変圧器運転状態あるいは輸送状態などの諸条件下（熱、振動、外力、機械力等）において、構造物としての構造信頼性を評価する必要がある。そこで、ガス絶縁変圧器の構造物に想定される条件下において、合成繊維ボードの物理的特性及び機械的特性を要素試験により実測し、評価した。また、合成繊維ボードを変圧器の構造物として適用した状態における、絶縁性能を把握する必要がある。そこで、SF₆ガス中（絶対圧0.5MPa）で合成繊維ボードのインパルス・交流絶縁特性を測定し、その絶縁性能を評価した。合成繊維ボードの諸特性については、変圧器の絶縁材料として従来から使用されているセルロースボードと比較した。

(3-1) 機械的特性

(1) 引張り強さ、伸びの温度依存性

JIS K6911に準じた試験方法により、引張り速度50mm/minの条件で引張り強さ、伸びの測定を行った。また、変圧器の運転条件下の雰囲気における特性を評価するために、20℃から140℃までの温度特性についての測定も実施した。

図1に合成繊維ボード及びセルロースボードについて、引張り強さ、伸びの温度特性を測定した結果を示す。合成繊維ボードの引張り強さは、温度と共に低下し、120℃においては、20℃のときに比べて約1/2に低下している。また、油入り変圧器に使用されているセルロースボードと比較すると引張り強さはセルロースボードの約20%、伸び量は約2倍となっていることが確認された。本測定は、変圧器を設計する際不可欠な基礎特性であるため調査した。変圧器運転中に発生する応力は、合成繊維ボードの引張り強さ以下であることを確認しており、実用上問題ないと考えている。

(2) 圧縮強さ、破断時のひずみ量の温度依存性

JIS K6911に準じた試験方法により、圧縮速度1mm/minの条件で圧縮強さ、ひずみ量の測定を行った。また、変圧器の運転条件下の雰囲気における特性を評価するために、20℃及び120℃の温度について測定を実施した。

図2に合成繊維ボード及びセルロースボードについて、圧縮強さとひずみ量の関係を測定した結果を示す。圧縮応力に対するひずみ量は、応力が大きくなるほど増加する傾向にある。また、120℃にて測定したひずみ量の方が、25℃にて測定したひずみ量に比べ大きくなっていることが分かる。セルロースボードと比較するとひずみ量15%以上では、同一圧縮強さ当たりのひずみ量は大きくなっている。

(A)

(B)

図1 引張り強さ、伸びの温度特性

Fig.1 Temperature characteristic of tensile strength and strain.

図2 圧縮強さ-ひずみ特性

Fig.2. Characteristic relation between Compressive strength and strain.

本測定も前項と同様、変圧器を設計する際、不可欠な基礎特性であるため調査した。今回得られたデータにより、変圧器組立時及び運転中における材料の健全性を評価することができる。

(3) 弾性率の温度依存性

曲げモードにより、弾性率の測定を行った。また、変圧器の運転条件下の雰囲気における特性を評価するために、25℃から150℃の温度について測定を実施した。これは、中身構造物の固有振動数と通電周波数が合致すると共振し、騒音あるいは振動を増大させる可能性があるためである。

図3に合成繊維ボード及びセルロースボードについて、弾性率を測定した結果を示す。合成繊維ボードの弾性率は、80℃以上の温度になると急激に低下し、120℃付近ではセルロースボードの弾性率と比較して約1/4となっている。弾性率は3.2項で得られた圧縮強さ、破断時のひずみ量と同様に変圧器設計の際には、今回得られた弾性率を十分に考慮する必要がある。

(3.2) 物理的特性

(1) 線膨張係数の温度依存性

昇温速度5℃/min、25℃～180℃の測定条件により、線膨張係数を測定した。

図4に合成繊維ボード及びセルロースボードについて、線膨張係数を測定した結果を示す。セルロースボードの線膨張係数と比較すると、約10倍程度合成繊維ボードの方が大きくなっている。本測定は、変圧器を設計する際に不可欠な基礎特性であるため調査した。しかし、いずれも変圧器の構造信頼性に影響を及ぼすレベルではない。

図3 弾性率の温度依存性

Fig.3 Temperature characteristic of Elastic modulus.

(2) 比誘電率の温度特性

試料を電気炉にて加熱し、比誘電率の測定を行った。

図5に合成繊維ボード及びセルロースボードについて、比誘電率を測定した結果を示す。

合成繊維ボードの比誘電率は、セルロースボードと比べて低くなっている。100℃以上でやや増加する傾向にあるが、広い温度範囲内で大きな変化は見られない。(3.3)(3)で後述するとおり、絶縁材料の低誘電率化によりガス部分への電界集中が緩和され、合成繊維ボードではセルロースボードに比べ絶縁特性が向上する。これ以降、合成繊維ボードの比誘電率の公称値を2.5、セルロースボードを3.7とする。

図4 線膨張係数の温度特性

Fig.4. Temperature characteristic of linearly expansion factor.

図5 比誘電率の温度特性

Fig.5. Temperature characteristic of dielectric modulus.

(3) 体積抵抗率の温度特性

試料を電気炉中において加熱し、体積抵抗率の測定を行った。

図6に合成繊維ボードについて、体積抵抗率を測定した結果を示す。合成繊維ボードの体積抵抗率は、100℃以上で急激に低下する傾向にあるが、室温と160℃での違いは約3桁である。

(4) SF₆ ガス中における耐熱性

図7(A)に示す加熱容器に試料を入れ、一定温度(120℃、140℃、160℃、180℃)にて保持した状態で所定時間(1日～1ヶ月)放置した後、引張り試験による伸びを測定した。

合成繊維ボードについて、伸びの50%残率の寿命曲線を図7(B)に示す。本来は引張り強度で評価すべきであるが、今回評価する材料については引張り強度による測定が困難であることから、伸びの50%残率により評価した。本図より、20000時間の寿命に対する温度は、120℃以上となっており、材料の寿命を IEC60216 に準じて評価すると、耐熱温度120℃以上に相当する。(ただし、図1に示したように、合成繊維ボードの引張り強度はセルロースボードより低くなっていることを十分に考慮する必要がある。) 本結果から、従来から油入り変圧器に使用されているセルロースボードに比べ、変圧器の温度上昇限度を高めることができる。ガス絶縁変圧器の冷却媒体として使用されているSF₆ガスの熱容量(絶対圧0.53MPa)は、油の約1/80であるため、ガス絶縁変圧器の冷却性能は、極端に低くなっている。そこで、高耐熱合成繊維ボードを適用することにより、変圧器の温度上昇限度を25[K]高くすることができる。これにより、大容量ガス絶縁変圧器(275kV-300MVA、E種)を実現することが可能となった。

(3・3) 絶縁特性

(1) インパルス破壊特性

図8(A)に試験電極構成を示す。平行平板電極の間に試験試料として合成繊維ボードまたはセルロースボード(両方とも20mm×30mm×厚さ10mm)を挟み、平板電極の片側を接地、もう片側に正極性雷インパルス電圧(1.2/50μs)を印加した。平板電極と試料の間には電極表面の影響を緩和するためポリエチレンテレフタレートフィルム(25μm厚)を挟んだ。合成繊維ボードおよびセルロースボードは材料の層に沿った方向に電圧を印加した。図8(B)にインパルス破壊電界を示す。

インパルス破壊電界は合成繊維ボード、セルロースボードとも同等であり、合成繊維ボードがセルロースボードと比較してインパルス耐圧上、問題ないことがわかった。

図6 体積抵抗率の温度特性

Fig.6. Temperature characteristic of volume resistivity.

(A) 耐加熱寿命試験方法

(B) 試験結果

図7 耐熱寿命曲線

Fig.7. Half-reduction time for temperature.

(2) 交流部分放電特性

図 9 (A) に試験電極構成を示す。エポキシでモールドした平板電極で板状の合成繊維ボードおよびセルロースボードを挟み、平板電極の片側を接地、もう片側に交流電圧を印加した。合成繊維ボードの厚さは 1.3mm、1.6mm、3.2mm (1.6mm×2 枚)、セルロースボードの厚さは 2mm とした。図 9 (B) に部分放電開始電界を示す。

合成繊維ボードでは、部分放電開始電界が厚さの増加につれて低下する。セルロースボードは合成繊維ボードの厚さ依存性と比べて若干低い部分放電開始電界となった。以上から、合成繊維ボードはインパルス、交流絶縁特性ともセルロースボードと少なくとも同等以上であることがわかった。

(3) 低誘電率化による絶縁特性の向上

前章からセルロースボードと合成繊維ボード自体の絶縁特性は同等であることがわかった。一方、合成繊維ボードは比誘電率がセルロースボードよりも低いことから、セルロースボードと比較して電界緩和の効果が期待され、絶縁特性の向上につながると考えられる。

ガス絶縁変圧器のセクション間はスペーサにより間隔を保っているが、スペーサと巻線素線との間に絶縁物で挟まれたくさび状の微小ギャップが生じる。この微小ギャップには電界が集中するため、変圧器の絶縁設計を行う上での最も重要な要素となる。巻線セクション間（セクション間 6.5mm）におけるスペーサと素線の間に生じる微小ギャップの電界と誘電率の関係（100kV 印加時）を図 10 に示す。電界評価は最弱点となるくさび部の 20° の位置で行った⁽⁵⁾。スペーサの比誘電率が低下するとセクション間における微小ギャップの電界は緩和する。合成繊維ボードをスペーサとして利用することで、本計算を例にとると、セルロースボードと比較して約 15% セクション間スペーサ部におけるくさびギャップの電界が緩和されていることがわかる。

実験により合成繊維ボード適用の効果を確認するため SF₆ ガス圧 0.5MPa（絶対値）において巻線間絶縁モデルを用いてセクション間のインパルス部分放電特性を測定した。

図 11 (A) に試験モデルを示す。50 μ m 厚 PET を 10 回巻回した巻線素線間にスペーサ（4mm 厚または 8mm 厚）を挟んだ。素線外側にはシールドを設けた。低圧巻線を模擬した接地平板電極との間にダクトピースで間隔を設けた。スペーサ、ダクトピースはセルロースボードまたは合成繊維ボードとした。図 11 (B) にインパルス部分放電開始電圧を示す。

図 11 から部分放電開始電圧は合成繊維ボードの方がセルロースボードと比較して 12%~20% 上昇している。一方、スペーサと巻線素線間に生じるくさびギャップの電界は同等であり、材料の低誘電率化による部分放電特性の向上が確認された。

以上より、合成繊維ボードを適用することにより、耐圧

向上の効果が得られ、絶縁許容値についてもセルロースボードより高いレベルで設計できることが確認された。つまり、合成繊維ボードの適用により、高電圧・大容量ガス絶縁変圧器を実現することが可能となることが判明した。

図 8 インパルス試験モデルおよび試験結果
Fig.8 Impulse test model and result.

図 9 交流試験モデルおよび試験結果
Fig.9 AC test model and result.

4. むすび

合成繊維ボードについて、機械的特性、物理的特性、誘電特性及び絶縁特性を調査し、セルロースボードの諸特性値と比較した。得られた結果の概要は、以下の通りである。

(1) 合成繊維ボードの機械的特性および物理的特性について調査し、ガス絶縁変圧器に適用する際の有用な基礎データが得られた。また、セルロースボードの諸特性値との比較から、セルロースボードの代替材料として使用できることを確認した。

(2) 合成繊維ボードの比誘電率は 2.5、セルロースボードは 3.7 であり、比誘電率は合成繊維ボードの方がセルロースボードよりも低くなる。比誘電率は 100℃ 以上でやや増加する傾向にあるが、広い温度範囲内で大きな変化は見られない。また、絶縁材料の低誘電率化によりガスギャップの電界が約 15% 緩和される。

(3) 合成繊維ボードの耐熱クラスは E 種相当以上であることが確認された。

(4) 合成繊維ボードのインパルス絶縁特性は、セルロースボードと同等であることが確認された。

(5) 合成繊維ボードを使用することでセルロースボードよりも巻線間の絶縁特性が 12~20% 向上することを確認した。

上述に示したように、機械的特性および物理的特性についての評価試験結果から、合成繊維ボードを従来より油入り変圧器に使用してきたセルロースボードの代替品として使用できることを確認した。また、合成繊維ボードを適用することにより、ガス絶縁変圧器の温度上昇限度を高めることができ、また、絶縁許容値についてもセルロースボードより高いレベルで設計できることが確認された。つまり、合成繊維ボードの適用が大容量ガス絶縁変圧器の実現に大きく寄与しており、今回得られた知見に基づき、275kV-300MVA ガス絶縁変圧器を設計し、完成させることができた。

(平成11年7月26日受付, 平成11年11月4日再受付)

文 献

- (1) 高橋他：「大容量ガス絶縁変圧器の開発」電気論 B、115 巻 4 号、346 (1995)
- (2) 緒志他：「大容量ガス絶縁分路リアクトルの開発」電気学会静止器、SA-95-38
- (3) 電気学会技術報告：「不燃性・難燃性変圧器の現状とその動向」、第 459 号、平成 5 年 4 月
- (4) 鎌田他：「新しい低誘電率プレスボードを用いた超高压大容量変圧器絶縁の開発」電気論 B、110 巻 9 号、753 (1990)

図 10 スペース比誘電率と微小ギャップの電界の関係

Fig.10 Relationship between dielectric permittivity of spacer and electric field of small gap.

図 11 部分放電測定モデルおよび試験結果

Fig.11 Partial discharge measurement model and result.

- (5) 乾他：「SF6 ガス中くさびギャップを有する系でのインパルス絶縁特性」電学論 A、112、113 (平 4-2)

村松 浩史

(正員) 1966 年 1 月 23 日生まれ。

91 年 3 月東北大学大学院材料加工学専攻修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。浜川崎工場にて、主としてガス絶縁変圧器の開発、設計に従事。

合田 剛

(正員) 1969 年 1 月 23 日生まれ。

94 年 3 月青山学院大学大学院電気電子工学専攻修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。主としてガス絶縁の研究に従事。

池田 正巳

(正員) 1943 年 9 月 14 日生まれ。

62 年 3 月神奈川工業高校電気科卒業。同年 4 月東京芝浦電気(株)〔現(株)東芝〕入社。高電圧技術開発をへて、電力用変圧器の開発設計などの業務に従事。1999 年 5 月以来、九州工業大学客員教授。電気学会論文賞、進歩賞、工学博士(慶應大学)、IEEE 会員

平井 匡平

(正員) 1958 年 2 月 20 日生まれ。

83 年 4 月慶應義塾大学大学院機会工学専攻修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。主として変圧器の騒音、振動現象に関する研究に従事。

石岡 康昭

(正員) 1945 年 3 月 9 日生まれ。

63 年 3 月秋田県立能代工業高校化学科卒業。同年 4 月(株)東芝入社。主として変電機器用絶縁材料の研究開発に従事。

戸田 克敏

(正員) 1956 年 12 月 1 日生まれ。

81 年 3 月東京大学大学院電気工学修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。浜川崎工場にて、主として電力用変圧器、ガス絶縁変圧器の開発に従事。工学博士(東京大学)